

超小型風力発電用コルゲート翼に関する特性研究

著者	篠原 章太郎
号	10
学位授与機関	Tohoku University
学位授与番号	環博第69号
URL	http://hdl.handle.net/10097/59060

氏 名	しの はら しょう た ろう 篠 原 章 太 朗
授 与 学 位	博士 (環境科学)
学 位 記 番 号	環博第 6 9 号
学 位 授 与 年 月 日	平成 2 4 年 9 月 2 5 日
学位授与の根拠法規	学位規則第 4 条第 1 項
研究科, 専攻の名称	東北大学大学院環境科学研究科 (博士課程) 環境科学専攻
学 位 論 文 題 目	超小型風力発電用コルゲート翼に関する特性研究
指 導 教 員	東北大学教授 石田秀輝
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 石田 秀輝 東北大学教授 田路 和幸 東北大学教授 橋田 俊之 教授 小幡 章 (日本文理大学)

論 文 内 容 要 旨

産業革命を契機に急加速した人間活動の拡大によって地球環境の劣化は急速に進んだ。

1972 年に発表されたローマクラブの「成長の限界」は、人間活動の拡大と環境資源の損失とのジレンマを明らかにし、地球環境を顧みない開発によって発展してきた社会に大きな衝撃を与えた。同年 6 月には国連人間環境会議が開催され、ストックホルム宣言によって、天然資源の計画管理等の環境保全を実施するための行動と枠組みが形成された。その後、1992 年にリオで開催され、180 を超える国だけでなく多数の民間団体が参加した地球サミット(環境と開発に関する国連会議)では、持続可能な開発という概念が多くの人々に認識され、その行動原則(環境と開発に関するリオ宣言)や、具体的な行動計画(アジェンダ 21)が採択された。そして現在に至るまでにも地球環境に関する様々な取り決めや、国際間協力がなされてきた。しかしながら、地球環境の劣化は進み続けているのが現状である。

石田は地球環境に対するリスクを、資源・エネルギーの枯渇、生物多様性の劣化、水や食料の分配の問題、人口増加、気候変動の 7 つに分類し、これらは人間活動の肥大化によって引き起こされたものであり、これこそが地球環境問題であると定義した。そして、我々が何もしないまま、従来のペースで人間活動肥大化が続くとしたならば、2030 年までに 7 つのリスクの多くが限界に達し、我々の手で文明崩壊の引き金を引く可能性がある事を示した。しかしながら、これまでの人間活動は莫大なエネルギー利用による開発によって生み出された利便性の高い技術によって支えられてきたという一面があり、一度体験した豊かさは容易に手放すことはできないという現実がある。従って、環境問題解決の為には人間の「生活価値の不可逆性」の理解が非常に

重要で、生活価値を下げないまま、人間活動の肥大化を停止、縮小させるような技術開発が求められているとも言える。

上記の地球環境問題の認識を基盤とした新しい技術開発手法として、ネイチャー・テクノロジーがある。この手法は、従来技術のテクノロジー・オリエンテッド思考とは異なり、ライフスタイル（暮らし方のかたち）を基盤とするもので、初めに生活価値の不可逆性を考慮しながら、将来訪れる厳しい環境制約下でも、心豊かに暮らせる生活のシーンを描く。次に、描いたライフスタイルに必要なテクノロジーを抽出する。そして、抽出した技術要素を完璧な循環を持った自然の中に求め、最後に、自然に学んだ技術を人間が利用可能なテクノロジーとしてリ・デザインするというものである。環境負荷を与えない自然界から暮らしのシーンに必要な技術要素を探求していることから、リ・デザインされたテクノロジーは低環境負荷の技術となる。本研究では、ネイチャー・テクノロジー創出システムに従って、微弱な風エネルギーを容易に利用できるライフスタイルを描いた。このライフスタイルには、低風速(低レイノルズ数域)でも効率良く機能する超小型風車が必須となる。しかしながら、これまでに低レイノルズ数域でも機能できる翼型を持つ小型風車は存在せず、その研究例も殆どなかった。

本研究では、低レイノルズ数域において優れた滑空能力を持つウスバキトンボの翅に注目した。ウスバキトンボの翼型は薄くギザギザした断面を持ち、一般的な航空機が有する流線形翼型とは全く異なる。このようなコルゲート翼型の従来研究からは、低レイノルズ数域において高い空力特性を持っている事が明らかにされている。しかしながら、コルゲート翼の詳細な形状機能は明らかにされておらず、風車用低レイノルズ数翼型を自由に設計することはできていない。本研究ではトンボのコルゲート翼型をベースに、その形状機能を明らかにし、低レイノルズ数域で機能する風車翼型の研究を目的とした。

第2章においては、低レイノルズ数域での空気力学研究に必須となる微小3分力天秤を製作し、コルゲート翼型の空力データを取得した。そして取得した空力データから、コルゲート翼型の形状機能の考察を行った。

これまでコルゲート翼型の形状機能が明らかにされなかった理由として、低レイノルズ数流れにおいて作用する微小な流体力の計測が困難であった事が挙げられる。従って、本章では低レイノルズ数域で翼に作用する微小な揚力、抗力およびモーメントを計測可能な高精度水槽用微小3分力天秤装置を製作した。実験は流れの相似則を用いて、回流式実験水槽で行うことで、精密に製作された大型のコルゲート翼模型を用いることを可能とし、空力データ計測の精度向上を図っ

た。計測に用いた翼模型は、ウスバキトンボの翼断面データから製作したウスバキトンボ翼型が 6 枚(ウスバキトンボ前翅、後翅 25%、50%、75%翼型)、ウスバキトンボ翼型の特徴的な翼形状を反映させたコルゲート翼型が 4 枚(コルゲート No.1 翼型~No.4 翼型)、そして空力特性比較の翼型として曲板翼型 1 枚の合計 11 枚である。これらの翼模型には、翼端渦を排除する翼端板が取り付けられており、2 次元流れでの計測が可能となっている。空力特性計測はレイノルズ数が $Re=7000, 11000, 15000$ の範囲で行い、迎角範囲は $\alpha=-12[\text{deg}]$ から、 $\alpha=20[\text{deg}]$ の間で実施した。そしてそれぞれの空力データから、形状機能を考察した結果、以下の知見が得られた。

- 1) 曲板翼型の揚力特性は、凹凸断面を持つ翼型には無い大きな非線形性を持つ。これは、低レイノルズ数域の強い粘性の影響によって起こる層流剥離域の発生と消失によるものと考えられる。
- 2) ウスバキトンボ前翅 25%翼型を除いた、その他の凹凸断面を持つ翼型は抵抗が曲板翼よりも低いことから、適切な凹凸形状を翼型に施すと、その性能を向上させることが可能である。本研究で明らかになった低レイノルズ数において有効と考えられる翼形状は以下の通りである。
 - ・ 翼下面は翼前縁と後縁を結ぶ水平線に沿うような凹凸形状を持つ。
 - ・ 翼上面の凹凸形状は、凸部の頂点を結んだ線が前縁から後縁にかけて最大矢高が翼弦長の 5%程度の弓なりの形状である。
 - ・ 翼前縁上面には適当な強さの渦が生じるような凹凸断面を有する。
- 3) コルゲート No.1 翼型、No.4 翼型および曲板翼型は、揚抗比が迎角に依存し難い領域を持つ。
- 4) コルゲート No.1 翼型の持つ前縁張り出しは、抵抗を減少させ流れの剥離を遅らせる効果を持つ。
- 5) コルゲート No.3 翼型の翼後部にある凸部 D は翼後縁からの逆流を防止し、流れの剥離を遅らせる効果を持つ。

第 3 章では、第 2 章で得られた空力データから、レイノルズ数の増加がコルゲート翼型の空力特性に及ぼす影響について注目し、コルゲート翼形状機能を考察する。そして、本研究が求めるマイクロ風車に必要な翼型特性を明らかにし、本研究範囲内でマイクロ風車に適すると考えられるコルゲート翼型(コルゲート No.5 翼型)を提案して、第 2 章で用いた高精度水槽用 3 分力天秤によって空力データの取得を行う。本章では以下の知見を得た。

- 1) 曲板翼型は、レイノルズ数が増加するにつれて、揚力特性に見られた非線形性は弱くなり、また、抵抗が小さくなり、揚抗比が飛躍的に高くなった。最小抵抗係数を比較すると、 $Re=7000$ および 11000 においては $Re=7000$ の半分以下である。また、レイノルズの増加に伴う揚抗比の平均増加量は約 4.0 と非常に大きい。
- 2) コルゲート翼型の殆どは、レイノルズ数が増加しても曲板翼型の様には揚抗比特性を大きく変化させない。殆どのコルゲート翼型は揚抗比の変動が 0.6 以内である。これは、レイノルズ数が増加すると、凹凸形状を持つ翼型の揚力は大きくなるものの、抵抗が小さくなるためである。
- 3) コルゲート翼型については、レイノルズ数が $Re=15000$ に増加すると、コルゲート No.1 翼型および No.2 翼型は厚翼、コルゲート No.3 翼型および No.4 翼型は層流翼型の揚抗特性に類似した翼特性を持つようになる。
- 4) コルゲート No.1 翼型、No.4 翼型および曲板翼型は、 $Re=7000$ においては迎角に揚抗比が依存し難い領域を持っていたが、 $Re=11000$ および 15000 になるとその特性が見られなくなり、揚抗比は最大値を取ると低下するようになる。
- 5) コルゲート No.1 翼型が有する前縁張り出しは、レイノルズ数が変化しても揚力向上の効果を持つ。ただし、流れの剥離を抑える効果は、レイノルズ数 $Re=15000$ では有していない可能性がある。
- 6) コルゲート No.3 翼型が有する翼後部の凸部 D は、レイノルズ数が変化しても流れの剥離を遅らせる効果を持っている
- 7) マイクロ風車翼型として提案したコルゲート No.5 翼型はレイノルズ数の増加に対して、高い揚抗比を広い迎角範囲で維持可能である。

第 4 章では、コルゲート翼型周りの流れの可視化実験を行い、第 2 章、第 3 章で得られた空力データと共に考察し、コルゲート翼型の形状機能を明らかにした。本章実験では、第 2 章で用いた回流式の実験水槽を用いている。本実験でも流れの相似則を利用する事によって、大型の翼模型を用いた詳細な流れの現象の可視化を行う事が可能となっている。可視化実験結果と取得した空力データを考察する事により以下の知見が得られた。

- 1) 本章で得られた流れの可視化実験結果と、第 2 章および第 3 章で取得した空力データの考察結果が良く一致している事が確認され、コルゲート翼型の形状機能を明らかにする事ができた。

- 2) コルゲート No.1 翼型が有する前縁の張り出しは、レイノルズ数 $Re=7000$ および $Re=11000$ における流れに対しても、低い迎角では流れの勢いを減少させる事で抵抗の増加を抑え、大迎角では流れの剥離を遅らせる効果を持つ事が明らかとなった。
- 3) コルゲート No.3 翼型が翼後部に持つ凸部 D は、レイノルズ数 $Re=7000$ における流れでは、低い迎角範囲においては凸部 D 周りに循環流れを生じさせ、摩擦抵抗を減らす効果があることが明らかとなった。また、大きな迎角範囲では、凸部 D が翼後縁からの逆流を防ぎ、流れの剥離を遅らせる効果を持つ事も明らかとなった。
- 4) 第 3 章で提案したコルゲート No.5 翼型の可視化実験結果からは、前縁張り出しと、凸部 D が有する抵抗減少および流れの剥離を遅らせる効果が干渉無く翼型に付加されており、コルゲート No.5 翼型は計測に用いた翼型の中で最も滑らかな流れを実現している事が明らかとなった。

第 5 章においては、第 3 章で得られたコルゲート No.5 翼型を採用した小型風車を製作し、風洞実験および屋外実験によってその特性を評価した。本章研究では以下の知見が得られた。

- 1) ゼファー社の小型風車 (Z-501) との比較から、コルゲート No.5 翼型を用いた風車は、従来の小型風車 (Z-501) に比べて、低風速域でも高いパワー係数 $[C_p]$ で機能することが可能で、これまでに回収されてこなかった風速 $V=2.0[m/s]$ 以下のエネルギーを国内の多くの地域で回収できる可能性を有する。
- 2) コルゲート No.5 風車のフィールド実験からは、風速の増加に対してはパワー係数 $[C_p]$ が低下することから、風速の増加に対してもコルゲート翼型は大きな揚抗比変化を示さない。従って、1)の結果からも、コルゲート No.5 翼型を風車に適用しても、第 3 章で明らかにした低速域で高い揚抗比を持ち、風速風向変動に対して揚抗比を変化させない特性が維持されている事が分かった。
- 3) フィールド実験時の観察結果からは、コルゲート No.5 風車の剛性が風車性能に影響していることも考えられた。従って翼の剛性が風車性能に与える影響を明らかにする必要がある。

本論文では、ネイチャー・テクノロジーという技術開発手法を用いて、トンボのコルゲート翼型に着目し、低レイノルズ数におけるコルゲート翼型の空気力学特性計測を実施し、マイクロ風車に適すると考えられる低レイノルズ数翼型を提案した。そして、低レイノルズ数翼型を採用した超小型風車の特性計測を行う事で、微弱な風エネルギーを利用可能な新しい超小型風力発電機の可能性を示した。

論文審査結果の要旨

本研究は、低レイノルズ数域を飛翔するトンボのゴルゲート翼型をベースにした低速風(低レイノルズ数)利用超小型風力発電用風車の創出を目的としたものである。

第1章では、ネイチャー・テクノロジー創出システムをベースに、バックキャスト視点から低風速エネルギーの利用が可能なライフスタイルを提案し、このライフスタイルに必要なテクノロジーを抽出した。それは、低レイノルズ数域で利用可能な風車用翼型の開発であり、自然界で最も低速で滑空飛行の行えるトンボのゴルゲート翼型に着目し、これをベースに研究を進めた。

第2章では、低レイノルズ数域の空気力学特性の研究に必須となる高精度水槽用3分力天秤(3分力天秤)を独自に開発し、これを用いた測定を行った。測定は、長距離飛行が可能なウスバキトンボの翼型に着目し、また、ウスバキトンボのゴルゲート翼型の特徴を反映した4枚のゴルゲート翼型および曲板翼型を用い、空力データを高精度で測定することに成功した。また、取得した空力データを基に、ウスバキトンボ翼型、ゴルゲート翼型、曲板翼型の低レイノルズ数域における翼型周りの流れの現象および、その形状機能を考察した。

第3章では、取得した空力データをもとに、レイノルズ数の変化に伴うゴルゲート翼型の特性について考察した。第2章、第3章の知見を基に、低速風利用超小型風力発電用風車に適するゴルゲート翼型を設計し、これが、超小型風車に適する特性を持っている事を明らかにした。

第4章では、開発した低レイノルズ数域専用の可視化実験手法を用いて、取得した空力データから考察した形状機能が、流れの可視化実験結果と合致している事を確認し、ゴルゲート翼型周りの流れの現象および形状機能を明らかにした。

第5章においては、風車用ゴルゲート翼型を採用した超小型風車を製作し、その特性を風洞実験および、フィールド実験によって評価し、風車特性の評価を行った。ゴルゲート翼型がレイノルズ数の増加に対して、低レイノルズ数域では安定した揚抗比を持つものの、さらにレイノルズ数が増えることにより、流線型翼の性能を示す傾向を示し、その後、レイノルズ数が 1×10^5 近辺で特性が急激に低下する可能性を明らかにした。

これらの研究により、トンボの翅およびこれを基本として開発されたゴルゲート翼周りの空気力学特性を定量的、定性的に初めて明らかにし、この特性を利用した超小型風車が従来の流線型断面を有する翼型ではエネルギーの吸収できないとされていた低風速域でエネルギーの吸収が可能な事を示した。

これらの成果は、粘性の壁と言われ、従来計測が不可能であり、ほとんど報告の無いレイノルズ数 1×10^5 以下の領域での研究成果であり、実験手法の開発およびその成果は高く評価できる。

よって、本論文は博士(環境科学)の学位論文として合格と認める。